



# 黄土丘陵沟壑区工程建设 场地规划与设计

杨宝山 李凯玲 门玉明 著



科学出版社

# 黄土丘陵沟壑区 工程建设场地规划与设计

杨宝山 李凯玲 门玉明 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍黄土丘陵沟壑区大厚度填方场地对工程建设的影响及其场地稳定性和建筑适宜性的评价方法与工程应对措施。全书共8章, 主要内容包括: 研究区地质条件及施工概况, 填方区建筑物基础(含桩基础、桩筏基础、条形基础等)变形特征研究, 挖填结合场地直埋管道与综合廊道的变形特征研究, 黄土丘陵沟壑区建设场地地基稳定性评价及挖填场地建筑适宜性评价方法等。

本书可供土木工程、地质工程、岩土工程、安全工程等领域的工程技术人员和高等院校师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

黄土丘陵沟壑区工程建设场地规划与设计 / 杨宝山, 李凯玲, 门玉明著.  
—北京: 科学出版社, 2018.1

ISBN 978-7-03-055102-3

I. ①黄… II. ①杨… ②李… ③门… III. ①黄土高原-丘陵地-沟壑-  
场地-建筑设计 IV. ①TU201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 269375 号

责任编辑: 亢列梅 杨 丹 乔丽维 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年1月第一版 开本: B5 (720×1000)

2018年1月第一次印刷 印张: 12 1/2

字数: 252 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

陕西是西北地区重要省份，是实施“一带一路”倡议的重要节点。延安作为西北重镇，在其中将发挥不可替代的作用。然而受黄土丘陵沟壑区特殊地形地貌的影响，城镇建设用地日益紧缺，“平山填沟，上山建城”工程越来越多，由此产生的工程技术难题广受关注。

首先，根据国家和陕西省《中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》的相关部署，依托延安新区“平山填沟”工程挖填场地，在综合分析前期研究资料和成果的基础上，研究人员开展了高填方区域灌注桩全尺寸现场模型试验、桩筏和筏板基础物理模型试验、条形基础模型试验、埋管管道的物理模型试验，对不均匀沉降下土与结构的变形过程进行了监测，并结合数值模拟结果得到结构与岩土体内的应力、应变变化规律，分析了不同基础形式对黄土高填方不均匀沉降变形的适应效果。其次，采用 ArcGIS 空间分析技术，通过对工程地质条件、水文地质条件、填方条件等因子进行加权叠加，对黄土沟壑高填方地区典型区域进行了建设场地稳定性分析和建筑适宜性评价，提出安全、经济、合理的场地利用方案。最后，结合挖填场地适宜性评价结果，根据地基稳定性情况，提出工程场地规划和设计的基本要求和建设建议；综合考虑沟谷挖填场地的边坡稳定性、高填方部位的沉降变形以及水环境变化造成的各种问题，分析挖填地基对建筑物和管道的影响，确定合理的建筑物平面布局、可行的建筑参数和地基处理方案等。

研究成果主要表现在：构建了考虑填筑体厚度、挖填交界面坡度、水文地质条件、地表渗透系数等多因素耦合的黄土丘陵沟壑区挖填场地地基稳定性综合评价模型，提出了基于 GIS 的黄土丘陵沟壑区挖填场地建筑适宜性评价方法；进行了挖填场地灌注桩现场试验，研究了灌注桩的工作性能，揭示了挖填交界面桩侧摩阻力的分布规律；研究了挖填结合场地建筑基础及管道工程的受力变形规律，提出了挖填结合场地工程设计技术建议。

本书的出版得到陕西省科技统筹创新工程项目（2012KTZD03/07）和陕西省自然科学基金基础研究计划项目（2017JM4015）的资助。本书是课题组全体成员的共同成果，主要参与人员有杨宝山、门玉明、李凯玲、董琪、甄平福、高洁、韩冬冬、李艳、段旭、贾朋娟、张昌翌、程辉、曹蕊、邹愈、刘洋杭、南晓敏、袁时雨等。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正！

作 者

2017年7月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 黄土高填方场地地基变形特征研究现状	2
1.2.2 高填方场地不均匀沉降变形研究现状	4
1.2.3 地基不均匀沉降下基础适应性研究现状	5
1.2.4 沉降作用下管道变形研究现状	9
第 2 章 研究区地质条件与施工概况	11
2.1 研究区位置	11
2.2 研究区自然条件	12
2.2.1 气象条件	12
2.2.2 水文概况	14
2.2.3 地形地貌	15
2.3 工程地质条件	18
2.3.1 区域地质与构造	18
2.3.2 地层岩性及分布	18
2.3.3 场区不良地质问题	19
2.3.4 天然岩土的物理力学性质	20
2.3.5 填方区压实黄土物理力学性质	23
2.4 填筑施工概况	26
2.4.1 地下盲沟排水系统概况	26
2.4.2 原地基的工程处理方法	27
2.4.3 填筑体的工程处理方法	27
2.5 本章小结	28
第 3 章 填方区建筑物基础变形特征研究	29
3.1 引言	29

3.2	桩基工作性能研究	29
3.2.1	试验设计	29
3.2.2	试验数据分析	32
3.2.3	数值模拟分析	38
3.3	桩筏基础变形特征研究	49
3.3.1	研究思路	49
3.3.2	试验方案设计	49
3.3.3	试验数据分析	54
3.3.4	数值模拟分析	60
3.4	条形基础变形规律研究	69
3.4.1	试验方案设计	69
3.4.2	试验数据分析	74
3.5	基础类型优选	88
3.5.1	建筑物基础选型影响因素	88
3.5.2	BP神经网络的计算原理	88
3.5.3	实例	89
3.6	本章小结	92
第4章	挖填场地直埋管道与综合廊道变形特征研究	94
4.1	引言	94
4.2	直埋管道模型试验研究	94
4.2.1	试验设计	94
4.2.2	沉降模拟	95
4.2.3	试验测试内容	96
4.2.4	物理模型试验结果及分析	97
4.3	直埋管道模型数值模拟分析	104
4.3.1	模型建立	104
4.3.2	模拟结果分析	105
4.4	综合廊道模型试验研究	109
4.4.1	试验设计	109
4.4.2	试验模拟	110
4.4.3	试验测试内容	111
4.4.4	物理模型试验结果及分析	112
4.5	综合廊道数值模拟研究	118
4.5.1	模型建立	118
4.5.2	模拟结果分析	119
4.6	高填方场地管道工程变形破坏判据	120

4.7	黄土高填方区管道工程建设风险控制措施	126
4.7.1	引起地下管道破坏的危险因素	126
4.7.2	管道防灾的结构设计建议	127
4.8	本章小结	129
<b>第 5 章</b>	<b>黄土丘陵沟壑区建设场地地基稳定性评价研究</b>	<b>131</b>
5.1	研究方法	131
5.1.1	一般方法	131
5.1.2	研究方法确定	132
5.2	挖填场地地基稳定性评价指标体系	134
5.2.1	指标体系构建原则	134
5.2.2	挖填场地地基稳定性影响因素分析	135
5.2.3	评价指标体系确定	138
5.3	建设场地稳定性评价实例	140
5.3.1	评价因子权重	140
5.3.2	构造判断矩阵	141
5.3.3	基于 GIS 的场地稳定性因子分析	144
5.3.4	建设用地稳定性评价结果分析	149
5.4	本章小结	152
<b>第 6 章</b>	<b>黄土丘陵沟壑区挖填场地建筑适宜性评价</b>	<b>153</b>
6.1	研究思路	153
6.2	挖填场地建筑适宜性评价指标体系	154
6.2.1	体系建立原则	154
6.2.2	适宜性评价指标分析	155
6.2.3	评价指标等级划分	158
6.3	基于 GIS 的场地适宜性评价实例分析	158
6.3.1	建立指标模型	158
6.3.2	具体计算	159
6.3.3	适宜性因素分析	161
6.3.4	场地适宜性综合分析	165
6.3.5	建筑适宜性分析	167
6.4	本章小结	168
<b>第 7 章</b>	<b>工程建设场地规划、设计及地基处理技术</b>	<b>169</b>
7.1	沟谷挖填场地建设的相关理念	169
7.1.1	可持续发展理念	169

7.1.2	绿色生态理念	169
7.1.3	安全理念	170
7.2	工程建设场地规划原则	170
7.3	不良土体处置	171
7.3.1	换填垫层	171
7.3.2	强夯处置技术	172
7.3.3	沉管砂石桩法	173
7.3.4	化学改良法	174
7.3.5	地下排水系统	174
7.4	土方工程填筑技术	176
7.4.1	一般规定	176
7.4.2	土方场地工程控制标准	177
7.4.3	谷坡(挖填)接槎过渡段处理及分层填筑技术	178
7.5	边坡防护设计	181
7.5.1	挖方高边坡的设计依据及原则	181
7.5.2	填方高边坡的设计依据及原则	181
7.5.3	边坡防护	182
7.5.4	坡面排水	182
7.5.5	坡面表面防护	183
7.6	线性工程控制措施	183
7.6.1	一般要求	183
7.6.2	填方区场地要求	183
7.6.3	挖填结合区场地要求	184
7.7	建筑结构工程措施	184
7.7.1	一般要求	184
7.7.2	填方区场地建筑	184
7.7.3	挖填结合区场地	186
7.8	本章小结	186
<b>第8章</b>	<b>结论与建议</b>	<b>187</b>
8.1	结论	187
8.2	建议	188
	<b>参考文献</b>	<b>190</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景

延安市位于陕北南部，北连榆林市，南接关中咸阳、铜川、渭南三市，东隔黄河与山西省临汾市、吕梁市相望，西依子午岭与甘肃省庆阳市为邻，古称延州，历来是陕北地区政治、经济、文化和军事中心。城区位于宝塔山、清凉山、凤凰山三山鼎峙之间，延河、南川河二水交汇之处，自古为兵家必争之地，有“塞上咽喉”“军事重镇”之称，被誉为“三秦锁钥，五路襟喉”。境内有历史遗迹 5808 处，革命纪念地 445 处，是国务院首批公布的全国 24 个历史文化名城之一。

受地形地貌影响，延安市所辖 1 区 12 县中，99%的县城处于黄土丘陵沟壑区，属于典型的山间河谷型城市。特殊的地形地貌决定了城市可利用的土地资源极其紧缺。

随着西部大开发战略的实施，作为国家及陕西省重要的能源基地、国家“山川秀美工程”的重要实验基地、中国革命圣地及历史文化名城的延安，其经济、文化、基础设施及城镇建设均得到飞速发展，但受黄土丘陵沟壑地形地貌条件的限制，城镇建设与可利用土地资源紧缺的矛盾日益突出，“平山填沟、上山建城”成为当前可行的解决途径之一。

延安新区建设按照“依托老城，沿川展开，整流域治理”的原则，确定了新区三大片区，分别为北区、东区和西区（图 1.1），总规划控制面积  $78.5\text{km}^2$ 。新区规划致力于实现旧城向新城、由内而外扩容的城市发展新模式的转型，在扩容中将更多的省级重要服务功能纳入新区，通过发展新区进一步提升城市职能和城市竞争力。

由于在黄土丘陵沟壑区域进行平山填沟建新城，在国际建城史上也鲜见先例，尤其是国内外对高填方工程建设场地的系统研究较少，缺乏深入的研究，因此在新城建设中面临的许多技术难题将没有成熟经验可供借鉴。目前，在已经动工建设的新区（北区），与老城区落差已达 100m 左右。在新城建设中，无论地基的处理还是排水系统的规划建设，都面临着新的考验。

西北地区特殊的黄土沟谷地貌已经成为其城市发展的最大制约因素，随着适宜城市建设的场地越来越少，高填方工程将会是西北地区城市发展中常见的工程。然而，“平山填沟”不仅改变了原黄土沟谷地貌，还形成了大量高填方区和挖填结合区，带来了新的岩土工程问题。

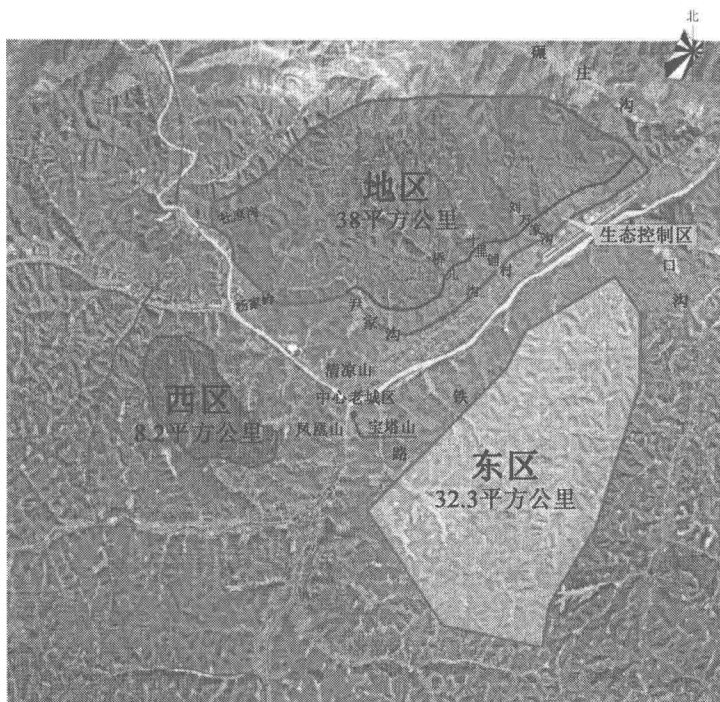


图 1.1 延安新区规划范围

鉴于黄土工程性质的特殊性，高填方地区的工程建设并不能完全照搬现有规范和技术标准，需要完善和建立一套符合黄土丘陵沟壑区填土工程实际状况的技术标准。因此，研究依托延安新区“平山填沟”发展战略工程对挖填场地进行综合分析，通过对高填方黄土地基不同基础的适应性进行研究，确定合理的建筑基础设计参数、施工措施，并分析不同类型的管道工程应对挖填场地黄土不均匀沉降变形的适应效果及土与结构相互作用的受力变形规律，提出延安黄土丘陵沟壑区沟谷高填方场地地稳稳定性评价方法和建筑适宜性评价方法，最终提出延安黄土丘陵沟壑区挖填场地工程建设规划方案。此研究成果和关键技术将填补黄土丘陵沟壑区高填方工程相关技术的空白，补充和完善相关技术规范，对促进行业技术进步，提高黄土地区的工业与民用建筑、交通、矿山建设等的勘察、设计和施工技术水平等具有巨大的促进和推动作用。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 黄土高填方场地地基变形特征研究现状

黄土具有结构疏松、孔隙大、垂直节理发育、成分均匀无层理和遇水有湿陷

性等特征<sup>[1]</sup>, 这些特性给高填方工程带来了一定的困难。黄土高填方地基的变形是一个长期的动态的变化过程, 建筑结构设计的最大难题就是工后沉降变形控制及变形规律的探究。考虑到人工平山填沟改变了原有地表水和地下水的渗透路径, 可能会产生地表水的汇集和地下水位的抬升, 造成高填方地基的沉降变形和不稳定。近年来通过黄土变形规律的宏观分析<sup>[2,3]</sup>和细观分析研究<sup>[4,5]</sup>, 揭示了黄土高填方地基变形与整体失稳的相互关系, 解释了近几年频发的黄土高填方工程事故的原因。朱才辉等<sup>[6]</sup>通过对比吕梁机场高填方地基变形监测与电阻率模型试验结果, 表明黄土高填方地基总变形主要为原地基和填方表面以下一定深度黄土的固结变形及深部超固结填土的蠕变变形; 在此基础上量化分析了填土厚度、地基综合压实度、填土速率、时间等因素对高填方工后沉降的影响, 提出了基于应变速率的工后沉降递推分析法。目前, 国内外高填方工程原位监测技术研究也逐渐兴起, Loganathan 等<sup>[7]</sup>在很早之前就已针对黏土填土路基提出采用变形分析 (filed deformation analysis, FDA) 方法对施工阶段及工后阶段的沉降规律进行分析; 朱才辉等<sup>[8]</sup>通过对吕梁机场黄土高填方工后沉降为期近两年的原位监测, 并结合大量的原位监测资料、室内条件下排水和不排水压缩试验<sup>[8,9]</sup>, 参考 Asaoka<sup>[10]</sup>的研究成果, 修正了 Loganathan 等<sup>[7]</sup>提出的假定, 认为黄土高填方地基的工后总沉降中, 主固结沉降占比 74%, 其余 26% 主要为蠕变沉降, 提出了适用于黄土高填方地基的工后沉降分量分析方法。

国外研究非饱和土固结问题始于 20 世纪 60 年代, 其中以 Fredlund<sup>[11]</sup>的固结理论最为成熟, 并被引入膨胀土、残积土等填方工程的变形沉降预测分析中。近年来, 非饱和黄土理论研究逐渐得到重视, 李佳等<sup>[12]</sup>通过试验方法得到了水在非饱和黄土地基中的渗透范围和含水率变化规律, 并讨论了暂态饱和区的形成机制; 吴燕开等<sup>[13]</sup>通过深入分析西安地区饱和及非饱和黄土的工程性质, 提出了非饱和黄土的加载体积流变模型。非饱和黄土的理论研究, 奠定了湿陷性黄土研究工作的坚实基础。

刘彦随在《自然》杂志评论中说明了延安新区建设的关键在于“三面一体一水”问题——原地面处理、挖方区和填方区交界面(挖填结合区)处理、临空面滑坡防治、填土体夯实和地表地下水防渗排放。研究表明, 降雨入渗会造成土体负孔隙压力发生变化, 同时可能导致填土内地下水位抬升, 降低填土的有效强度, 引发填土体地基失稳, 因此“水”是影响高填方地基稳定性的最重要的问题。

大部分对于降雨引起的路堤地基滑塌机理的研究主要基于对饱和土样的试验, 通过对饱和土样分别做各向异性固结不排水试验和常规剪切排水试验, 来模拟暴雨引起的局部滑动直至整体流体性滑塌的转变。试验结果表明, 大部分的破坏首先是相对缓慢的初始变形, 紧接着是土体快速转变为黏滞性流体, 这些研究结果清楚地表明了前期局部静态垮塌引发了整体流体性滑塌。然而, 邱路阳等<sup>[14]</sup>

研究指出,工程实际中所遇到的大部分天然残积土体多为不饱和的或者局部饱和的,同样。对于非饱和土,Brand<sup>[15]</sup>提出,受降雨入渗影响,土体负孔隙压力的减小导致潜在滑动面处有效正应力减小,抗剪能力随之降低;雨水通过填土地基的坡顶、坡面和坡脚进入土体,使一定深度范围内的土体湿润或饱和,降低了填土强度;降雨还导致填土地基坡面和坡体内的渗流条件发生变化,坡体、坡面产生渗流力,坡面受侵蚀冲刷。邱路阳<sup>[16]</sup>进一步分析了填土地基沿交界面滑动的失稳机理,降雨使渗流多集中在挖填交界面(结合区)附近,此处非饱和土体局部率先出现膨胀,孔隙率增大,孔隙水压力降低,随着雨水的进一步入渗,裂隙被渗流水填充,孔隙水压力迅速恢复,膨胀继续扩大,周而复始使结构面逐步软化形成软弱面,滑体原有裂隙扩展或产生新裂隙。裂隙的进一步扩展造成破坏面逐渐贯通,当滑动块体所受剪应力超过其抗剪强度时即沿软弱面滑出。虽然这些研究的对象为高填方残积土路堤,但研究人员提出的非饱和土填方地基失稳过程、交界面滑动机理、填方体浸水湿化变形<sup>[17]</sup>等规律,同样适用于黄土高填方地基。

### 1.2.2 高填方场地不均匀沉降变形研究现状

高填方地基是原地基土体和人工填土体两部分共同组成的特殊地质体。高填方地基沉降变形包括原地基的沉降变形和填土体压缩沉降变形两部分,由于这两部分沉降有差异,会出现实际工程中常见的不均匀沉降问题。因此,对高填方地基沉降变形的控制一般分为对原地基的处理和填土体的压实两部分。目前,针对非饱和黄土高填方地基沉降变形控制技术的研究较少,处理此类地基时主要参考其他土质的高填方地基处理技术。

原地基及填土地基除了在施工阶段会发生变形,在工程竣工后仍会由于高自重应力继续产生固结变形,沉降周期非常长,持续几年或者几十年都是有可能的,且沉降不易受控制。从目前对非饱和土高填方沉降变形的研究中可以看出,影响高填方地基稳定性的各类因素很多,内因主要有填筑料的岩土特性、碾压压实度、填筑速率、土层分布与岩土特性、地基处理效果和排水情况等,外因则是使用过程中的房屋荷载、降水、冻融与突发地震等。地基处理不当、填筑材料选择不合理、压实器械使用不科学、填土体压实不到位等,均会引起高填方体的不均匀沉降,缩短高填方工程寿命。减小地基沉降变形,需要改变土的工程特性,如改变其各项组成,提高土体的压实度。近年来,国内很多学者依托大量实际工程研究了高填方地基沉降变形控制技术,并得到了很多重要成果。梅源<sup>[18]</sup>通过比较研究强夯法、碎石桩和素土桩的处理效果,认为强夯法处理原地基高效、可行,是优先选用的方法,但他提出无论施工工艺如何,影响压实效果的关键因素是填土含水量,因此施工过程中要处理好土料的失水问题。

国内对房屋建筑高填方地基的研究基本未见到相关文献,在对高填方边坡、

高填方路堤、山区机场高填方地基稳定性和沉降变形控制方面可以看到一些研究成果。国内学者对高填方地基沉降变形控制技术的研究表明,原地基与填土地基对荷载响应特性有较大区别,原地基沉降曲线较为舒畅,沉降随荷载增加先逐渐发展,停止加载后一段时间内,沉降速率才逐渐降低;而填土地基在加载期间的沉降曲线陡而急,快速加载产生快速沉降,加载停止后,沉降速率迅速减小,导致沉降曲线在加载期间与停止加载之间存在明显拐点,并随工程间歇性施工加载,沉降量呈阶坎状发展<sup>[18]</sup>。

黄土沟壑区挖填方边坡稳定性分析作为研究岩土工程问题的重要课题之一,自20世纪20年代开始就有学者开始研究。文献中提及的常用分析方法有极限平衡法、数值分析法、块体理论法和赤平极射投影法等确定性方法,以及可靠性理论、分形几何、模糊数学、人工智能和灰色预测系统等不确定性理论和方法。尽管上述分析方法在实际工程中得到了广泛的应用,但土坡稳定分析是一个比较复杂的问题,经历近一个世纪的发展改进,提出了多种计算方法,仍有一些因素有待研究确定,如滑动面形式的确定、按实际情况合理地取用土的抗剪强度参数、土的非均匀性及土坡内有水渗流时的影响等。

延安新区受黄土高填方地基规模大、地表地下水防渗排放等不确定性因素的影响,以及黄土地区沟谷形态、沟岸地层结构等地形条件所形成的空间效应影响。虽然有学者认为新区建设通过做盲沟处理地下水,形成主、次、支的鱼翅状排水系统,在不破坏原有水系的前提下,导引和排出地下水,避免因地下水的冲刷而造成填方区的地基下陷;在填方区采取分层碾压和强夯处理等多种工程措施,保证填方区的土体压实度和工程质量标准,新区建设安全性是有保障的<sup>[19,20]</sup>。但就地质学而言,虽然挖山后的夷平面的稳固性是有一定依据的,然而“填谷”形成的“假整合”“表面光”的稳定性是难以轻言的,黄土高填方的土体压实度、均匀性和稳定性都很难保证,地基极易产生不均匀沉降问题。因此,有必要研究黄土沟壑区高填方地带大规模新城建设的高填方地基稳定性问题。

### 1.2.3 地基不均匀沉降下基础适应性研究现状

桩筏基础具有良好的提高地基承载能力、减小地基变形沉降量、沉降调平(减少差异沉降)的功能,是高层建筑物或软土等不良地基上建筑物常用的基础形式。桩筏基础由桩基和筏板基础共同承担上部结构荷载,荷载一部分由筏基传递到浅层地基中,另一部分由桩体传递到深层土体中,这种考虑桩筏基础与地基共同作用的受力模式已有了较为全面的研究成果<sup>[21-23]</sup>。现有研究表明,桩筏基础主要有两个功能:一是提高地基的承载力;二是减少建筑物的差异沉降。对于不同的工程、不同的场地,两者在地基基础设计过程中考虑的权重是不相同的。现有的工程应用及理论研究大多数集中于南方软土地区的高层、超高层建筑的桩筏基础<sup>[24]</sup>,

与本书所研究的黄土地区高填方场地的桩筏基础及挖填结合场地的桩筏基础问题具有明显的差异性。虽然近年来,高速铁路发展迅猛,出现了一些采用 CFG 桩筏基础的铁路路基,其变形破坏特征对本书所研究的高填方场地桩筏基础具有一定的参考价值<sup>[25,26]</sup>,但因其土质、填方规模、施工方法等诸多差异因素的影响,相关理论和研究成果并不适合照搬过来,黄土地区高填方场地的桩筏基础应用研究值得进一步深入探讨。

吴勇华等<sup>[27]</sup>基于某跨越地铁高层建筑的设计实践,利用 ABAQUS 建立剪力墙与桩筏基础和地基共同作用的三维有限元数值模型,研究了跨越地铁隧道的桩筏基础受力情况和变形性状,并分析了上部结构刚度、逐层施工、地铁隧道跨度、跨越地铁隧道方式等因素对其影响。结果表明,上部为剪力墙结构的高层建筑,考虑上部结构刚度作用可显著减小筏板的差异沉降和弯矩。当上部结构刚度达到一定程度后,其对筏板差异沉降和弯矩的调节能力减弱,表现出上部结构刚度贡献的有限性。随着地铁隧道跨度的增加,筏板最大沉降、差异沉降和弯矩都增大,桩筏基础以筏板对角线与地铁隧道中心线重合的方式跨越地铁隧道对筏板的内力和变形影响最小。

栾茂田等<sup>[28]</sup>针对软土地区工程桩筏基础的工作机理及其与地基的共同作用进行了弹塑性耦合固结分析,表明地基的固结作用对桩筏基础-地基共同作用体系的受力与沉降变形特性影响明显,桩筏基础的沉降变形与受力特性的时间变化特征与下卧土层中超孔隙水压力和桩长变化等特性紧密相关。

水伟厚等<sup>[29]</sup>进行了软土地区桩筏基础的大型原位荷载试验,通过对筏板变形、桩顶反力、不同深度土的附加应力、深层土体分层沉降的监测,表明了由实测桩顶反力计算所得群桩承担的荷载仅占整个堆载的 45%,并可推测筏板底地基土承担了其余 55%的荷载,说明桩土的分担作用很明显;另外深层分层沉降监测结果表明,桩间土的沉降量比较大,桩端下部土体的沉降量比较小,这是由于桩间土分担了较多荷载,减小了桩端处的附加应力。

张武等<sup>[30]</sup>通过天然地基筏板和 4 组变刚度桩筏基础模型对比试验,分析了基桩平面布置、几何尺寸与基础沉降的关系,为桩筏基础变刚度调平设计思路提供了试验依据。研究表明,与上部结构共同作用的桩筏基础,沉降分布总体上表现为中心区沉降较大而边角处沉降较小;筏下均匀布桩与天然地基相比,基础沉降量的最大值约减少了 70%;基础中心区桩长增加 1 倍或桩数增加 1/3,沉降量的最大值约减少 50%;上部结构与核心内筒区局部加大基桩几何尺寸和适当增加桩数都能有效减小最大沉降量及差异沉降量,从而达到调平的效果;筏下布桩能够减少基础周边的地表沉降,使其影响控制在 1/4 基础宽度范围内。

姚曙光等<sup>[31]</sup>为了深入研究粉煤灰地基上高层建筑物-桩筏基础-地基共同作用规律,通过建立不同桩长和不同距径比的桩筏基础数值分析模型,探明了筏板

受力响应问题：在上部结构荷载作用下，筏板与桩周的位移量较大，筏板的整体沉降呈盆状；桩长越长，筏板沉降量越小，桩距径比越大，筏板沉降量越大。因桩体轴力的作用，筏板边缘桩位置处出现剪应力集中现象，且筏板内负弯矩有极大值，筏板内弯矩随着上部结构荷载的增大而增大；桩长越长，筏板内弯矩越大，桩距径比越大，筏板内弯矩越小。

蒋刚等<sup>[32]</sup>为研究桩间距对桩筏基础结构性能的影响，设计并进行不同桩间距的桩筏基础系列模型试验。结果表明，设置不同的桩间距可调配群桩基础中桩与筏板的分担作用，调整桩筏基础的受力性能，常规桩距桩筏基础以桩为承载主体，地基土的荷载分担次之；当桩间距大于 6 倍桩径后，桩较早进入塑性支承状态，地基土的分担荷载能力增强，桩与筏板荷载分担的主次作用发生转换，筏板逐渐转换为基础的承载主体。随着桩间距增大，筏板内力分布由整体弯曲过渡到以局部弯曲为主。同样受桩间距影响，桩顶荷载分布规律为开始角桩最大，随桩间距增大，逐渐转化为中间桩最大。建议桩筏基础设计方法应考虑桩间距设置对筏板与桩土体系相对刚度、筏板内力和桩顶荷载不均匀特征的影响。

崔维孝等<sup>[33]</sup>通过对高速铁路的 CFG 桩筏基础现场测试，研究得出了桩筏基础路基地基应力分布特征，桩筏基础路基地基的实际应力小于计算值是沉降计算误差产生的原因之一，桩筏基础路基地基加固存在临界桩长，地下水位以下土层自重应力计算采用浮容重是合理的。

截至目前，国内外对挖填方场地中条形基础变形特征、变形机理方面的研究不多，大多是采用数值模拟、理论推导的形式对条形基础的受力、变形方面的研究，或是对已有工程经验的总结。

唐业清<sup>[34]</sup>通过对填土地基上基础形式选用研究，指出在厚填土地基上，地基应力的叠加使建筑物中间部分的沉降加大，如采用条形基础时，为防止建筑物发生正向的或反向的弯曲，不使建筑物的中部或两端部出现较大的沉降变形，应调整中间或两端部条形基础底部面积或厚度，调整基底应力的分布，以保持建筑物的均匀沉降。

王维英<sup>[35]</sup>采用 Rite 位移分析法对填土地基上变截面条形基础的变形进行了研究，结果表明填土地基上变截面条形基础变形相对均匀，能够有效避免地基不均匀沉降导致的上部结构变形破坏。

徐欣<sup>[36]</sup>对黄土梁峁地区高填方场地基特点及不同基础形式的适用性进行了总结分析，指出当上部结构荷载较大，地基承载力又较低，且地基又不很均匀时，采用刚性基础往往会使基础断面过大，可采用钢筋混凝土条形基础。条形基础可以承受较大的弯矩和剪力，用基础断面大小和配筋量来满足受力要求，或是增加肋梁以增强条形基础的抗弯能力，调整不均匀沉降。

高峰<sup>[37]</sup>结合现场观测数据与理论推导，通过 ANSYS 有限元模拟软件模拟了

采空区地基沉降时条形基础、筏板基础与上部建筑的受力与变形情况,得出采空区沉降时采用条形基础的房屋在墙及楼板中应力较大且应力集中明显,易发生局部开裂。

田小娟<sup>[38]</sup>基于分层总和法的计算方法,考虑地基沉降计算的非线性特征,引入分级加载提出了条形基础下地基非线性弹性沉降计算方法。

金国芳等<sup>[39]</sup>对某发生不均匀沉降的条形基础房屋进行了计算分析,指出软弱地基中的条形基础沉降计算必须考虑各基础间附加应力相互叠加的影响。李想<sup>[40]</sup>在其研究中指出,地表曲率变化作用下,可通过设置多个变形缝减小条形基础中的附加应力,避免基础产生变形裂缝。王勇<sup>[41]</sup>对软弱地基上房屋常见易发事故进行了分析,指出当砌体结构下为条形基础时,地基的不均匀沉降效应会直接影响到上部,造成砌体结构的开裂。

填土作为一种因人类工程活动而堆积的土,由于堆积时间较短,大多处于欠固结状态。对于本书所研究的工程,虽然在工程前期论证了诸多夯实方法来保证填土的密实度,但依旧不能保证夯实后的填土具备和原状土相同的工程性质。填土的不均匀性和高压缩性成为桩筏基础控制差异沉降和保证承载力的最主要的不利因素。

由于延安地区地下水埋深较深,本书所研究桩筏基础不考虑水的浮力作用。对大多数框剪结构的高层建筑而言,考虑上部结构对筏板刚度的增持效应,设计中可对桩筏基础的尺寸进行优化,但在本书中,由于对黄土填方区高层建筑缺乏相关经验,为保证安全储备,暂不考虑上部结构与桩筏基础的共同作用,只将其作为荷载考虑。

由于填土中脱空区或薄弱层的存在,随着土体的工后沉降不断增大,原本的桩筏基础与地基土进行荷载分担的受力体系可能随着局部土体沉降过大而变成桩筏基础独立承担荷载,随着地基土退出承载,桩上荷载会逐渐增大,若桩筏基础采用的是摩擦桩,必然会导致桩身逐步下沉,此时筏板局部挠曲变形过大,易产生裂缝而破坏;若采用的是端承桩,桩顶荷载可能会超出桩基的设计承载力要求,而使桩身结构产生破坏。对于跨越挖填结合区的桩筏基础,地基土的不均匀性主要体现在挖方区的原状黄土和填方区的重塑黄土的工程特性差异。这种差异对其上的桩筏基础变形影响甚大,筏板基础在填土交界面上会出现明显的应力集中,若填方区的桩基不能很好地控制沉降,则整个筏板在挖填结合面附近会产生较大的挠曲变形,甚至折断。由于筏板的存在,桩筏基础协调变形,在薄弱地基处的桩基变形或破坏后,必然会引起连锁效应,使其他桩产生一定的弯矩,在弯矩作用下,也可能造成桩身的结构破坏。这几种破坏形式均会产生较大的不均匀沉降,对上部结构影响巨大,在设计和施工过程中必须采取有效措施予以规避。

### 1.2.4 沉降作用下管道变形研究现状

对于直埋管道受力变形的研究, Winkler<sup>[42]</sup>和 Hetenyi<sup>[43]</sup>提出将埋地管道及管道周围土体分别看成弹性地基梁和具有一定抗压刚度系数且相互独立的弹簧, 并假定管道不同位置处的变形和受力呈线性比例关系, 进而计算管道的变形和受力。

张土乔等<sup>[44]</sup>基于弹性地基梁模型, 针对地基差异沉降时管道的受力特性进行了研究, 计算出地基差异沉降时管道上的最大挠度、转角、弯矩等, 确定了管道的危险受力区域。

高惠瑛等<sup>[45]</sup>和冯启民<sup>[46]</sup>采用一种新的方法, 在沉陷区考虑管道几何大变形, 在非沉陷区将管道假设为半无限弹性地基梁, 对受沉陷作用的埋地管道进行了理论计算, 考虑管道截面在弯矩和轴力同时或分别作用下的塑性极限状态, 建立了埋地管道的破坏准则。

还有诸多学者对地基沉降、沉陷作用下管道的内力和变形进行了一系列理论及试验研究<sup>[47-50]</sup>。

随着科学技术的发展, 许多学者采用数值模拟方法, 利用有限元分析软件对沉降(陷)区埋地管道的变形规律和力学性状进行了研究分析, 数值模拟相较于模型试验不仅更加快速直观, 而且对许多无法进行试验的场景有着很好的效果。合理的数值模拟方法对试验研究和理论分析有着指导和互相检验的作用。

张国威<sup>[51]</sup>、冷建成等<sup>[52]</sup>、史永霞<sup>[53]</sup>基于 ANSYS 有限元软件计算归纳了基于地基沉降情况下的管道应力分布和变化规律, 得到了沉降量与最大等效应力的曲面关系, 定量计算分析了不同参数(如沉陷长度、埋深、管径、土特性等)对管线反应的影响程度。

杨朝娜<sup>[54]</sup>在建立三维管土接触模型时, 在管土交界面处创建了面面接触对, 并运用单元生死技术模拟了地基的逐步塌陷过程, 得出在土体塌陷范围不断扩大过程中埋地管线应力和位移的变化规律。

还有许多针对具体应用实例模拟不同沉陷类型和不同管道类型的研究, 如填海软土地基<sup>[55]</sup>、天然气管道<sup>[56]</sup>等, 均取得了不错的研究成果。

综合廊道也称地下综合管廊, 它是将两种或两种以上的管线集中布置在其中, 构成了以综合廊道为平台的市政管线敷设系统<sup>[57]</sup>。可以说综合廊道是城市市政基础设施建设现代化的重要标志之一, 是 21 世纪城市发展的方向。国内目前已建成的综合廊道的总长度不足百公里, 规模比起西方发达国家还有很大差距, 与日本的 600 公里的规模相比差距更大<sup>[58]</sup>。

当前对于沉降作用下综合廊道变形规律的研究尚属空白, 更多国内外学者对综合廊道变形的研究主要集中在抗震性能、振动响应、结构设计等方面, 其研究方法也多是物理模型试验与数值模拟相结合。